

Commande Adaptative Floue Indirecte avec Mode de Glissement des Systèmes Non Linéaires

Toufik Amieur⁽¹⁾, Mohamed Boumechraz⁽²⁾

⁽¹⁾ Département De Génie Electrique --Université de Kasdi Merbah Ouargla--

⁽²⁾ Département De Génie Electrique --Université de Mohamed Kheider Biskra--

⁽¹⁾ amieur.toufik@univ-ouargla.dz

⁽²⁾ medboumechraz@netcourrier.com

Résumé — Ce travail présente une commande adaptative indirecte floue robuste par mode glissant d'un système non linéaire. Un système flou a été utilisé pour approximer les dynamiques et les paramètres inconnus en utilisant le théorème de l'approximation universelle. Pour la robustesse du système bouclé, nous avons utilisé les modes glissants avec une surface linéaire. La stabilité globale a été étudiée à l'aide de la théorie de Lyapunov. Pour montrer l'efficacité de l'approche proposée, un exemple de simulation est présenté.

Mots Clés — Mode Glissant, Commande Adaptative Floue, Commande Robuste, Systèmes Non Linéaires, Distance Signée.

I. INTRODUCTION

La commande d'un système non linéaire est une tâche difficile même quand le modèle dynamique du système est disponible. Ce problème de commande est d'autant plus difficile si le modèle dynamique est inconnu ou mal connu. Les progrès enregistrés ces deux dernières décennies dans la théorie de la commande des systèmes non linéaires ont donné naissance à certaines méthodes systématiques de synthèse de lois de commande non linéaires. Parmi ces méthodes, on trouve la technique de linéarisation entrée sortie permettant l'analyse et la synthèse de la commande pour une large classe de systèmes non linéaires [1]. Cependant, cette technique ne peut être utilisée que pour les systèmes non linéaires dont le modèle dynamique est connu avec exactitude. Pour pallier ce problème, plusieurs approches de commande adaptative ont été introduites [2] [3]. Parmi ces approches, la commande adaptative floue a connu un succès considérable [4]. Il est à noter que dans cette approche de commande, il y a le problème de la possibilité de division par zéro et, dans ce cas, la loi de commande n'est pas bien définie. Pour éviter ce problème, en estimant directement l'inverse du gain de commande. Dans la plus part des approches de commande adaptative floue on utilise un terme de robustification, ce terme est une loi de commande par mode de glissement [5] [6] [7].

classique, a été améliorée en utilisant un terme de commande robuste. Ce terme est une loi de commande par mode de glissement à gain adaptatif afin d'assurer la robustesse et atténuer les effets des perturbations externes. Les systèmes flous sont utilisés pour estimer en ligne la dynamique du système et la loi de commande est synthétisée

en se basant sur cette estimation. Les lois de commande et les lois d'adaptation sont obtenues en utilisant la méthode de Lyapunov. Afin de tester son efficacité et sa robustesse, cette méthode de commande est appliquée pour résoudre le problème de la stabilité et la poursuite d'une trajectoire.

Ce papier est organisé comme suit :

Dans la première section II on présente la commande par mode de glissement et la distance signée. La section III et présente la commande adaptative floue avec mode de glissement et synthèse de la loi de commande et l'analyse de stabilité. En suite la commande étudiée est appliquée sur le pendule inversé (section IV). On termine par une conclusion.

II. COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT

Considérons le système mono-entrée mono-sortie décrit par les équations différentielles suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = x_{i+1}(t) & i = 1, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n(t) = f(X) + b(X)u(t) + d(t) \\ y(t) = x_1(t) \end{cases} \quad (1)$$

avec :

$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ est le vecteur d'état, $f(X)$ et $b(X)$ sont des fonctions non linéaires avec $b(X) \geq \underline{b} > 0$ avec \underline{b} une constante donnée, $u(t)$: la commande, $d(t)$: la perturbation considérée comme étant bornée : $|d(t)| \leq D$.

La surface de glissement est donnée par :

$$S(X) = \sum_{i=1}^{n-1} c_i x_i + x_n \text{ avec } c_i > 0, i = 1, \dots, n-1 \quad (2)$$

A partir de l'équation (2), on déduit que pour $S(X) = 0$, nous avons une équation différentielle linéaire dont la solution implique la convergence vers zéro de $x(t)$ et de ses dérivées jusqu'à l'ordre $n-1$ [1].

L'objectif de la commande se simplifie à la synthèse d'un contrôleur garantissant la convergence vers zéro du signal $S(X)$.

La dérivée de la surface de glissement est donnée par l'équation suivante

$$\dot{S} = \sum_{i=1}^{n-1} c_i x_{i+1} + f(X) + b(X)u \quad (3)$$

On désire assurer la condition d'attractivité ($S\dot{S} < 0$) de la surface $S(X)$. En utilisant (3), le calcul de $S\dot{S}$ donne :

$$S\dot{S} = S \left(\sum_{i=1}^{n-1} c_i x_{i+1} + f(X) + b(X)u \right) \quad (4)$$

Si les fonctions $f(X)$ et $b(X)$ sont connues, pour atteindre les objectifs de commande, on peut utiliser la loi de commande par mode de glissement suivante :

$$u = \frac{1}{b(X)} \left(- \sum_{i=1}^{n-1} c_i x_{i+1} - K \text{Sign}(S) - f(X) \right) \quad (5)$$

En utilisant (3), (5) devient

$$\dot{S} = -K \text{Sign}(S) \quad (6)$$

Ce qui implique que $S(X) \rightarrow 0$ quand $t \rightarrow \infty$, et par conséquent $x^{(i)}(t) \rightarrow 0$ quand $t \rightarrow \infty$ pour $i = 1, \dots, n-1$ [1].

La loi de commande (5) du système (1) peut être facilement implantée si $f(X)$ et $b(X)$ sont parfaitement connues. Ces fonctions étant généralement incertaines, le but est alors de les approcher par des systèmes flous.

II.1. Détermination de la distance signée d_s pour un point arbitraire :

Soit une surface de glissement de dimension $(n-1)$ dans l'espace d'état de dimension n :

$$S(X, t) = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_{n-1} x_{n-1} + x_n \quad (7)$$

Le vecteur normal N à la surface $S(X, t) = 0$ est donné par

$$N = \frac{[c_1, c_2, \dots, c_{n-1}, 1]^T}{\|[c_1, c_2, \dots, c_{n-1}, 1]\|} \quad (8)$$

La distance signée d_s pour un point arbitraire X est donnée par :

$$d_s = X^T N \quad (9)$$

Pour un système non linéaire décrit par l'équation (1), la distance signée d_s est [8] :

$$d_s = \frac{S(X, t)}{\sqrt{c_1^2 + c_2^2 + \dots + c_{n-1}^2 + 1}} \quad (10)$$

III. COMMANDE ADAPTATIVE FLOUE AVEC MODE DE GLISSEMENT

Les fonctions $f(X)$ et $b(X)$, peuvent être approximées en ligne en utilisant les systèmes flous définis comme suit :

$$\hat{f}(X, n_f) = w_f^T(X) n_f \quad (11)$$

$$\hat{b}(X, n_b) = w_b^T(X) n_b \quad (12)$$

avec $w_f(X)$ et $w_b(X)$ sont des vecteurs de fonctions floues de base supposées convenablement fixées à l'avance par l'utilisateur, n_f et n_b sont les vecteurs de paramètres à ajuster par un algorithme d'adaptation.

Les fonctions réelles $f(X)$ et $b(X)$ peuvent être approchées avec des systèmes d'inférence floue de la manière suivante [8] [10]:

$$f(X) = \hat{f}(X, n_f^*) \quad (13)$$

$$b(X) = \hat{b}(X, n_b^*) \quad (14)$$

avec n_f^* et n_b^* sont respectivement les valeurs optimales de n_f et n_b .

$$n_f^* = \arg \min_{n_f} \left\{ \sup_X |f(X) - \hat{f}(X, n_f)| \right\} \quad (15)$$

$$n_b^* = \arg \min_{n_b} \left\{ \sup_X |b(X) - \hat{b}(X, n_b)| \right\} \quad (16)$$

Notons que les valeurs optimales n_f^* et n_b^* sont des constantes artificielles inconnues introduites uniquement pour faire l'étude théorique de la stabilité de l'algorithme de commande. En effet, la connaissance de leurs valeurs n'est pas nécessaire pour l'implantation des lois de commande adaptatives [8] [11].

A partir de l'analyse ci-dessus, on peut écrire :

$$f(X) - \hat{f}(X, n_f) = w_f^T(X) \tilde{n}_f \quad (17)$$

$$b(X) - \hat{b}(X, n_b) = w_b^T(X) \tilde{n}_b \quad (18)$$

Avec : $\tilde{n}_f = n_f^* - n_f$ et $\tilde{n}_b = n_b^* - n_b$ les erreurs d'estimation paramétrique.

III. I. SYNTHÈSE DE LA LOI DE COMMANDE

Considérons maintenant la loi de commande suivante :

$$u = \frac{1}{\hat{b}(X, n_b)} \left(\sum_{i=1}^{n-1} c_i x_{i+1} - K \text{Sign}(S) - \hat{f}(X, n_f) \right) \quad (19)$$

Cette loi de commande résulte de (5) en remplaçant les fonctions $f(X)$ et $b(X)$ par leurs approximations floues $\hat{f}(X, n_f)$ et $\hat{b}(X, n_b)$ et elle ne peut garantir à elle seule la stabilité du système bouclé. Ceci est dû, d'une part, à l'existence des erreurs d'approximation et, d'autre part, au fait que cette loi de commande n'est pas définie lorsque $\hat{b}(X, n_b) = 0$. Pour traiter le problème des erreurs d'approximation, on a ajouté un terme de robustification à la loi de commande équivalente, et pour éviter la division par zéro lors du processus d'adaptation des paramètres n_b , soit on modifie sa loi d'adaptation soit on modifie carrément la loi de commande. Dans ce qui suit, nous montrons comment modifier la loi de commande pour surmonter ces problèmes. La loi de commande est donnée par :

$$u = u_{af} + u_n \quad (20)$$

La loi de commande (20) est la somme de deux termes : un terme de commande adaptative floue u_{af} , utilisé pour compenser les non-linéarités du système, et un terme de robustification de type mode glissant u_n , introduit pour pallier le problème des erreurs d'approximation. Le terme adaptatif flou est défini comme suit :

$$u_{af} = \frac{1}{\hat{b}(X, n_b)} \left(-\hat{f}(X, n_f) - \sum_{i=1}^{n-1} c_i x_{i+1} \right) \quad (21)$$

et le terme de robustification par mode de glissement u_n est donné par :

$$u_n = -K \text{Sign}(S) \text{ avec } K > 0 \quad (22)$$

Les paramètres du contrôleur flou sont adaptés par les lois d'adaptations suivantes :

$$\dot{n}_f = y_f w_f(X) S \quad (23)$$

$$\dot{n}_b = y_b w_b(X) u_{af} S \quad (24)$$

avec $y_f > 0$ et $y_b > 0$.

L'inconvénient de cette loi de commande est que la loi de commande n'est pas définie pour $\hat{b}(X, n_b) = 0$. Pour résoudre le problème de division par zéro dans la loi de commande, nous utilisons une nouvelle loi de commande bien définie garantissant les objectifs de commande.

Le terme adaptatif flou u_{af} est donné par :

$$u_{af} = \frac{\hat{b}(X, n_b)}{V_0 + \hat{b}^2(X, n_b)} \left(-\hat{f}(X, n_f) - \sum_{i=1}^{n-1} c_i x_{i+1} - S \hat{b}(X, n_b) S \right) \quad (25)$$

avec V_0 une constante positive petite et $S > 0$.

Le terme robuste u_n est défini comme suit :

$$u_n = -\frac{1}{\underline{b}} \left((\hat{K} + |\bar{u}|) \text{Sign}(S) + y_p d_s \right) \quad (26)$$

Soit \hat{K} la valeur estimée de K , on considère l'erreur d'estimation $\tilde{K}(t) = K - \hat{K}(t)$ et :

$$\dot{\tilde{u}} = \frac{V_0}{V_0 + \hat{b}^2(X, n_b)} \left(-\hat{f}(X, n_f) - \sum_{i=1}^{n-1} c_i x_{i+1} - S \hat{b}(X, n_b) S \right) \quad (27)$$

L'estimation des paramètres est faite par les lois d'adaptation suivantes :

$$\dot{n}_f = y_f w_f(X) d_s \quad (28)$$

$$\dot{n}_b = y_b w_b(X) d_s (u_{af} - S S) \quad (29)$$

avec $y_f > 0, y_b > 0$.

III.II. ANALYSE DE LA STABILITE

Pour étudier la stabilité du système en utilisant de la loi de commande (20) on utilise la méthode de Lyapunov. A partir de (25) et (27), on obtient la relation

$$\hat{b}(X, n_b) u_{af} = -\hat{f}(X, n_f) - \sum_{i=1}^{n-1} c_i x_{i+1} - S \hat{b}(X, n_b) S - \bar{u} \quad (30)$$

En utilisant les équations (20), (25) et (30), la dérivée de la surface de glissement peut être réécrite sous la forme

$$\dot{S} = (f(X) - \hat{f}(X, n_f)) + (b(X) - \hat{b}(X, n_b)) u_{af} + b(X) u_n - S \hat{b}(X, n_b) S - \bar{u} \quad (31)$$

En ajoutant et en retranchant le terme $S \hat{b}(X, n_b) S$, l'équation (31) devient

$$\dot{S} = w_f^T(X) \tilde{n}_f + w_b^T(X) \tilde{n}_b (u_{af} - S S) + b(X) u_n - S \hat{b}(X, n_b) S - \bar{u} \quad (32)$$

Considérons maintenant la fonction candidate de Lyapunov

$$V = \frac{1}{2} d_s^2 + \frac{1}{2y_f} \tilde{n}_f^T \tilde{n}_f + \frac{1}{2y_b} \tilde{n}_b^T \tilde{n}_b + \frac{1}{2y_K} \tilde{K}^2 \quad (33)$$

dont la dérivée temporelle est

$$\dot{V} = d_s \dot{d}_s - \frac{1}{y_f} \tilde{n}_f^T \dot{\tilde{n}}_f - \frac{1}{y_b} \tilde{n}_b^T \dot{\tilde{n}}_b + \frac{1}{y_K} \tilde{K} \dot{\tilde{K}} \quad (34)$$

A partir de (31), (34) devient

$$\dot{V} = d_s w_f^T(X) \tilde{n}_f + d_s w_b^T(X) \tilde{n}_b (u_{af} - S S) + d_s b(X) u_n - d_s S \hat{b}(X, n_b) S - d_s \bar{u} - \quad (35)$$

$$\frac{1}{y_f} \tilde{n}_f^T \dot{\tilde{n}}_f - \frac{1}{y_b} \tilde{n}_b^T \dot{\tilde{n}}_b - \frac{1}{y_K} (K - \hat{K}) \dot{\hat{K}}$$

A partir de (28) et (29), on a

$$d_S w_f^T(X) \tilde{u}_f - \frac{1}{y_f} \tilde{u}_f^T \dot{u}_f = 0 \quad (36)$$

$$d_S w_b^T(X) \tilde{u}_b (u_{af} - sS) - \frac{1}{y_f} \tilde{u}_b^T \dot{u}_b = 0 \quad (37)$$

Ce qui implique :

$$\dot{V} = d_S b(X) u_n - d_S s \hat{b}(X, u_b^*) S - d_S \bar{u} - \frac{1}{y_K} (K - \hat{K}) \dot{K} \quad (38)$$

En utilisant (26), (38) devient

$$\dot{V} = -\hat{K} \frac{b(X)}{\underline{b}} |S| - \frac{b(X)}{\underline{b}} |S| |\bar{u}| - \frac{b(X)}{\underline{b}} y_p d_S^2 - d_S s \hat{b}(X, u_b^*) S - d_S \bar{u} - \frac{1}{y_K} (K - \hat{K}) \dot{K} \quad (39)$$

Puisqu'on a supposé que $b(X) \geq \underline{b} > 0$, il est alors raisonnable de supposer que $\hat{b}(X, u_b^*) > 0$ et, de ce fait, (39) peut être simplifiée à

$$\dot{V} \leq -\hat{K} |S| - \frac{1}{y_K} (K - \hat{K}) \dot{K} \quad (40)$$

Pour que $\dot{V} \leq 0$, les loi d'adaptations sont conçues comme suite :

$$\dot{K} = y_K |S| \quad \text{Avec } y_K > 0$$

Donc (40) peut être réécrite par

$$\dot{V} \leq -K |S|$$

$$\dot{V} \leq 0$$

Remarque 1 : Le terme de robustification par mode de glissement donné par (26) peut être lissé par le remplacement de la fonction discontinue $Sign(S)$ par la

fonction continue $Sat\left(\frac{S}{\Phi}\right)$, ou Φ est une constante

positive. Dans ce cas, on ne peut qu'assurer la convergence de l'erreur de poursuite dans un voisinage autour de zéro.

Remarque 2 : Pour avoir une loi de commande bien définie même lorsque $\hat{b}(X, u_b) = 0$, on a remplacé $\hat{b}^{-1}(X, u_b)$

$$\text{par } \frac{\hat{b}(X, u_b)}{v_0 + \hat{b}^2(X, u_b)}$$

Remarque 3 : Le terme $s \hat{b}(X, u_b) S$ dans (25), est ajouté pour avoir une nouvelle loi d'adaptation pour les paramètres u_b (équation (29)). En fait, cette loi permet l'initialisation des paramètres u_b par zéro. Ceci est un avantage, car dans ce cas on n'a pas besoin de connaissances a priori sur les

valeurs optimales de u_b . Effectivement, on peut remarquer que si $S = 0$ et $u_b(0) = 0$, on a $u_{af} = 0$, $\dot{u}_b = 0$ et $u_b = 0, \forall t$.

IV. EXEMPLE DE SIMULATION

Pour illustrer les performances de la méthode de commande étudiée, nous considérons la commande d'un pendule inversé représenté par la figure.2. Son modèle dynamique est donné par [12]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = f(X) + b(X)u(t) + d(t) \\ y(t) = x_1(t) \end{cases} \quad (41)$$

Avec

$$f(X) = \frac{g \sin x_1 - \frac{m_p L x_2^2 \cos x_1 \sin x_1}{m_p + m_c}}{L \left(\frac{4}{3} - \frac{m_p \cos x_1^2}{m_p + m_c} \right)} \quad (42)$$

$$b(X) = \frac{\cos x_1}{m_p + m_c} \frac{1}{L \left(\frac{4}{3} - \frac{m_p \cos x_1^2}{m_p + m_c} \right)} \quad (43)$$

$x_1 = \theta$ est l'angle du pendule et $x_2 = \dot{\theta}$ la vitesse angulaire.

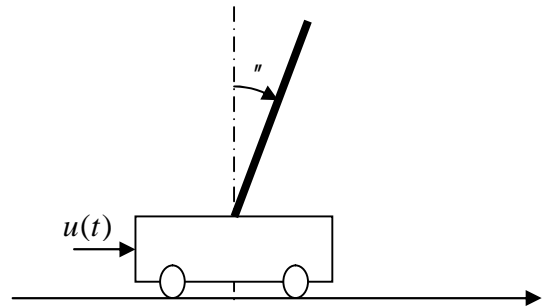


Fig.2. Schéma de principe du pendule inversé

Notons que les fonctions non linéaires $f(X)$ et $b(X)$ sont supposées inconnues. Dans cet exemple de simulation, les valeurs suivantes sont utilisées :

$$m_p = 0.1kg, m_c = 1kg, L = 0.5m, g = 9.81m/s^2$$

Chacune des fonctions (42) et (43) est approchée par un système flou, et chaque système flou a pour entrée les variables x_1 et x_2 . Bien que $b(X)$ est fonction seulement de x_1 , nous utilisons un système flou avec les entrées x_1 et

x_2 car la forme de la fonction est supposée inconnue. Pour chaque variable d'entrée, on définit cinq fonctions d'appartenance Gaussiennes comme suit :

$$\tilde{F}_i^1(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{Si } x_i \leq -1.25 \\ \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i + 1.25}{0.3}\right)^2\right\} & \text{ailleurs} \end{cases}$$

$$\tilde{F}_i^2(x_i) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i + 0.625}{0.3}\right)^2\right\}$$

$$\tilde{F}_i^3(x_i) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i}{0.3}\right)^2\right\}$$

$$\tilde{F}_i^4(x_i) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - 0.625}{0.3}\right)^2\right\}$$

$$\tilde{F}_i^5(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{Si } x_i \geq 1.25 \\ \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - 1.25}{0.3}\right)^2\right\} & \text{ailleurs} \end{cases}$$

Les paramètres de synthèse sont choisis comme suit $y_f = 0.001$, $y_b = 0.001$, $\ddot{\theta}_f(0) = 0$, $\ddot{\theta}_b(0) = 0.5$, $v_0 = 0.01$, $\underline{b} = 0.1$, $K(1) = 10$, $c_1 = 10$, $S = 20$, $\Phi = 2.5$, $y_p = 0.009$, $y_K = 10$.

Les résultats de simulation, la position angulaire, $y = x_1$, la vitesse angulaire, $\dot{y} = x_2$, sont représentées sur les figures 3-4 pour une variation paramétrique de 50% et de perturbation externe $d(t) = 0.01 * \sin(t)$ à partir à l'instant $t = 2s$ avec une condition initiale $\theta(0) = 60^\circ$, $\dot{\theta}(0) = 0$:

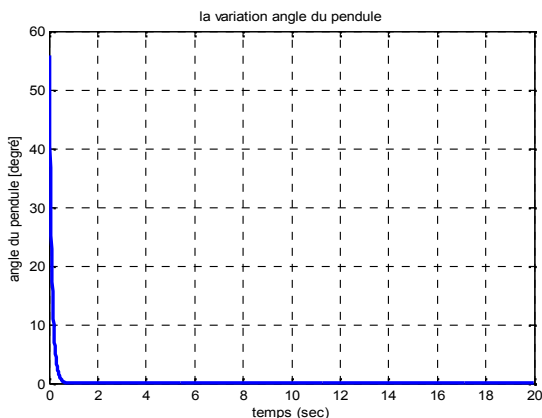


Fig. 3. Position du pendule.

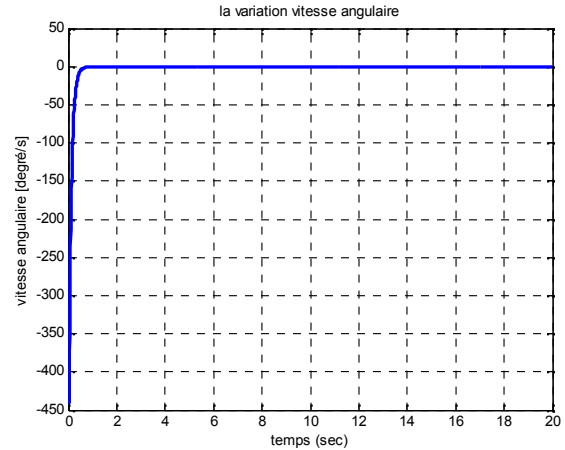


Fig.4. Vitesse du pendule.

Les figures suivantes représentent les résultats obtenus pour la poursuite du vecteur d'état désiré suivant :

$$\theta(t) = \sin\left(\left(\frac{f}{2}\right)t\right) \text{ et } \dot{\theta}(t) = \left(\frac{f}{2}\right) \cos\left(\left(\frac{f}{2}\right)t\right)$$

Les paramètres de synthèse sont choisis comme suit $y_f = 0.001$, $y_b = 0.001$, $\ddot{\theta}_f(0) = 0$, $\ddot{\theta}_b(0) = 0.5$, $v_0 = 0.1$, $\underline{b} = 0.1$, $K(1) = 10$, $c_1 = 10$, $S = 20$, $\Phi = 2.5$, $y_p = 0.1$, $y_K = 10$.

Les résultats de simulation, la position angulaire, $y = x_1$, la vitesse angulaire, $\dot{y} = x_2$, plan de phase, gain adaptatif sont représentées sur les figures 5-8 pour une variation paramétrique de 50% et de perturbation externe $d(t) = 0.01 * \sin(t)$ à partir à l'instant $t = 2s$ avec une condition initiale $\theta(0) = 60^\circ$, $\dot{\theta}(0) = 0$:

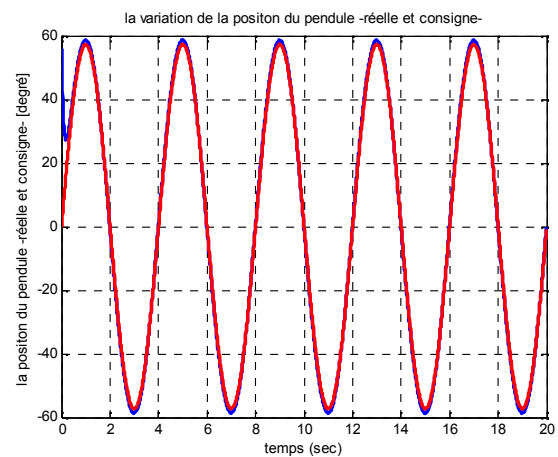


Fig.5. Position du pendule ; réelle, consigne.

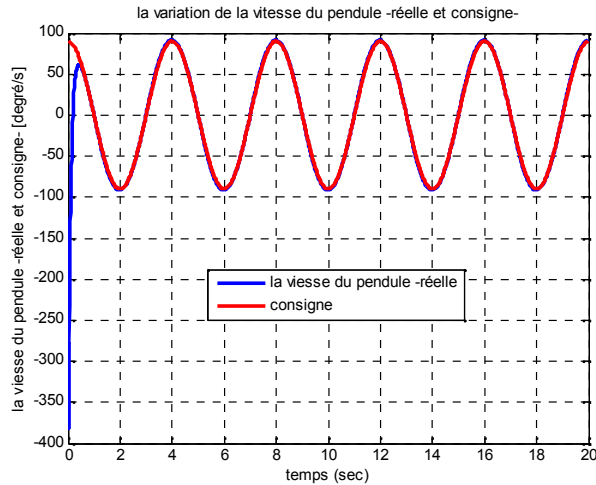


Fig.6. Vitesse du pendule ; réelle, consigne.

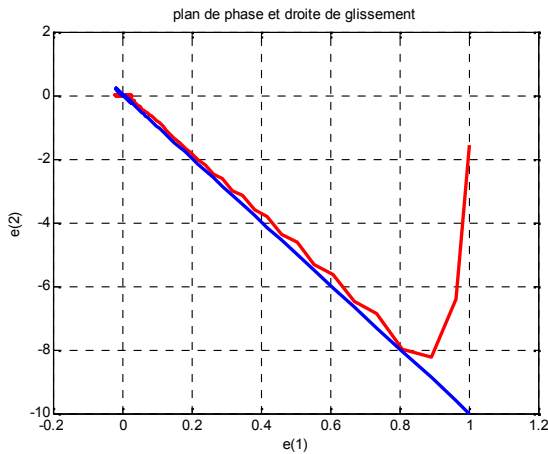


Fig.7. Plan de phase et la droite de glissement.

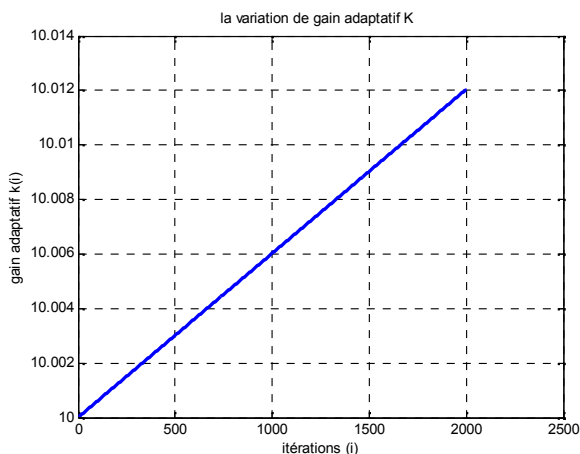


Fig.8. Gain adaptatif K.

V. CONCLUSION

Dans ce papier nous avons développé la commande adaptative indirecte pour une classe de systèmes non linéaires monovariables en utilisant les systèmes flous. Cette méthode, a été améliorée en utilisant un terme de commande robuste. Ce terme est une loi de commande par mode de glissement afin d'assurer la robustesse et atténuer les effets des perturbations externes. Le problème de la singularité de la loi de commande est résolu par l'approximation de l'inverse du gain de commande estimé. Le principe de cette approche est l'utilisation des systèmes flous adaptatifs pour l'approximation de la dynamique inconnue des systèmes non linéaires. Ces approximations sont utilisées ensuite dans une loi de commande par mode glissant. Les lois d'adaptation des paramètres des systèmes flous sont obtenues en utilisant la méthode de Lyapunov. Les résultats de simulations obtenus montrent l'efficacité de cette technique et la robustesse vis-à-vis des perturbations et des incertitudes du modèle.

REFERENCES

- [1] J. J. E. Slotine, W. Li, « *Applied nonlinear control* », Prentice-Hall, USA, 1991.
- [2] H.K. Khalil, « Adaptive output feedback control of nonlinear systems represented by input-output models », *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 41, no. 2, pp. 177-188, Feb. 1996.
- [3] P. Kokotovic and M. Arkac, « Constructive nonlinear control: a historical perspective », *Automatica*, vol. 37, pp. 637-662, 2001.
- [4] J.-H. Park and G.-T. Park, « Adaptive fuzzy observer with minimal dynamic order for uncertain nonlinear systems », *IEE Proc. Contr. Theory Appl.*, Vol. 150, N° 2, pp. 189-197, 2003.
- [5] S. Labiod, M.S. Boucherit, and T.M. Guerra, « Commande adaptative floue d'une classe de systèmes non linéaires monovariables », *Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications*, Tours, France, pp. 169-176, 2003.
- [6] H.F. Ho, Y.K. Wong, A.B. Rad, « Adaptive fuzzy sliding mode control with chattering elimination for nonlinear SISO systems », *Simulation Modelling Practice and Theory* Vol. 17, pp: 1199-1210, 2009
- [7] N. Noroozi, M. Roopaei, M. Z. Jahromi, « Adaptive fuzzy sliding mode control scheme for uncertain systems », *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, Vol.14, pp: 3978-3992, 2009.
- [8] O. Cerman, P. Hušek, « Adaptive fuzzy sliding mode control for electro-hydraulic servo mechanism », *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, pp: 10269-10277, 2012.
- [9] L.-C. Hung, H. P. Lin, H.-Y. Chung, « Design of self-tuning fuzzy sliding mode control for TORA system », *Expert Systems with Applications*, Vol. 32, pp: 201-212, 2007.
- [10] M. Roopaei, M. Zolghadri, S. Meshksar, « Enhanced adaptive fuzzy sliding mode control for uncertain nonlinear systems », *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, Vol. 14 pp: 3670-3681, 2009.
- [11] J.-P. Su, T.-M. Chen, C.-C. Wang, « Adaptive fuzzy sliding mode control with GA-based reaching laws », *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 120, pp. 145-158, 2001.
- [12] S. Wang, L. Hou, L. Dong, H. Xiao, « Adaptive fuzzy sliding mode control of uncertain nonlinear SISO systems », *Procedia Engineering*, Vol. 24, pp: 33-37, 2011.